

⑫

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

⑰ Anmeldenummer: 86112547.4

① Int. Cl.: H 01 J 49/44
 H 01 J 37/00

⑱ Anmeldetag: 10.09.86

⑳ Priorität: 13.09.85 DE 3532699

㉑ Veröffentlichungstag der Anmeldung:
 22.04.87 Patentblatt 87/17

㉒ Benannte Vertragsstaaten:
 DE NL

㉓ Anmelder: Firma Carl Zeiss

D-7920 Heidenheim (Brenz)(DE)

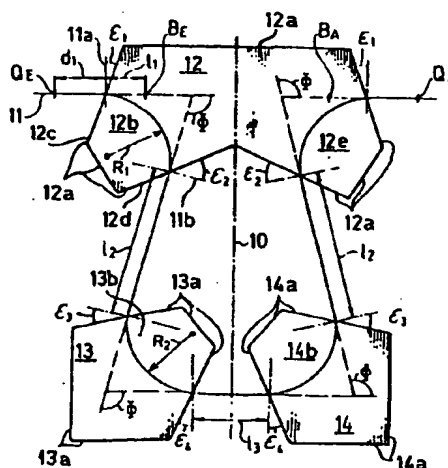
㉔ Erfinder: Rose, Harald, Prof. Dr.
 Prinz-Christians-Weg 5 1/2
 D-6100 Darmstadt(DE)

㉕ Erfinder: Lantio, Stefan
 Eichendorffstrasse 20
 D-6101 Rossdorf 2(DE)

㉖ Elektronenenergiefilter vom Omega-Typ.

㉗ Es wird ein abbildendes Omega-Filter mit geraden Kan-
 ten der Polschuhe angegeben, das eine gute Ortsauflösung
 und eine sehr gute Energieauflösung hat. Es besteht aus vier
 Umlenkbereichen mit Umlenkwinkeln, die größer als 90° sind.

Fig.1



Beschreibung:

85038x P EP

Elektronenenergiefilter vom Omega-Typ

Die vorliegende Erfindung betrifft ein abbildendes magnetisches Elektronenenergiefilter vom Omega-Typ, vorzugsweise für Elektronenmikroskope, mit vier Umlenk winkeln in Magnetfeldern.

Abbildende Elektronenenergiefilter, auch Elektronenfilter, Energiefilter oder Elektronen(energie)spektrometer genannt, werden bei Transmissions-Elektronenmikroskopen verwendet, um den Kontrast der Objektabbildung durch die Auswahl von Elektronen eines bestimmten Energiebereiches zu verbessern. Das ist am deutlichsten erkennbar bei nicht kontrastierten, sehr dünnen Präparaten mit einem gewählten Energieverlust (ΔE) im Bereich von ca. 100 bis 200 eV. Aber auch ein Objektbild, das durch rein elastisch gestreute Elektronen (Energieverlust $\Delta E=0$) entsteht, indem alle unelastisch gestreuten Elektronen ($\Delta E>0$) ausgeblendet werden, ist im Kontrast gegenüber dem ungefilterten Bild deutlich verbessert.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil eines Transmissions-Elektronenmikroskopes mit einem abbildenden Elektronenfilter besteht in der Möglichkeit element-spezifische Objektabbildungen, d.h. Element-Verteilungsbilder, gleichzeitig von einem relativ großen Objektbereich dadurch durchzuführen, daß der vom Elektronenfilter durchgelassene Energiebereich einer element-spezifischen Wechselwirkung der transmittierten Elektronen mit dem Objekt entspricht, also z.B. einer K-, L-, M-Absorption in der Atomhülle. Damit können qualitative und bei Messung der Intensitätsverhältnisse und Abzug des Untergrundes auch quantitative Verteilungsbilder von Elementen in dünnen Objekten (≤ 30 nm) mit sehr hoher Ortsauflösung ($\approx 0,5$ nm) und höchster Nachweisempfindlichkeit ($\approx 2 \cdot 10^{-21}$ g) gewonnen werden, die bisher mit keiner anderen Analysetechnik erreicht wurden. Höchste Ortsauflösung und Nachweisempfindlichkeit von Elementen sind sowohl für die biologische und medizinische Forschung als auch für die Material-Wissenschaft von großer Bedeutung.

Auch bei Elektronenbeugungsdiagrammen bewirkt ein abbildendes Elektro-

nenfilter durch die Ausblendung von unelastisch gestreuten Elektronen schärfere Bilder des Beugungsdiagrammes. Außerdem können Beugungsdiagramme von unelastisch gestreuten Elektronen eines bestimmten Energiebereiches aufgenommen werden.

Aus der DE-PS 20 28 357 ist ein Elektronenmikroskop bekannt, das eine Filterung des Objektbildes oder des Beugungsdiagrammbildes ermöglicht. Dabei wird ein Elektronenfilter verwendet, das aus einem magnetischen Prisma und einem elektrostatischen Spiegel besteht. Letzterer ist jedoch sehr empfindlich gegenüber äußeren Störfeldern; außerdem treten bei hohen Beschleunigungsspannungen für die Elektronen Isolationsprobleme auf. Daher werden in neuerer Zeit rein magnetische Filter bevorzugt. Bei diesen Energiefiltern unterscheidet man nach dem Verlauf der Elektronenbahnen sog. Alpha- und Omega-Filter.

Omega-Filter sind aus verschiedenen Veröffentlichungen bekannt. G. Zanchi e.a. (Optik 43, 495 (1975)) beschreiben eine Anordnung, die aus drei Magneten und drei Umlenkbereichen mit Umlenkwinkeln von 116° , 232° und 116° besteht. Mit vier Umlenkbereichen und Umlenkwinkeln von 90° oder kleiner sind mehrere Veröffentlichungen bekannt (H. Rose e.a. Optik 40, 336 (1974), D. Krahel e.a. Ninth International Congress on Electron Microscopy, Toronto, 1, 42 (1978), H. Wollnik e.a. Optik 46, 255 (1976)).

Ein abbildendes Elektronenfilter muß, damit es in einem Elektronenmikroskop optimal verwendet werden kann, folgende zwei Bedingungen erfüllen: Eine große Anzahl von Bildpunkten muß ohne Verlust an Ortsauflösung übertragen werden und die Bildfehler in der Ausgangsquellebene (auch als Selektionsebene bezeichnet) müssen so gering sein, daß kleine Energiebreiten (der durchgelassenen Elektronen) realisiert werden können.

Bei den aus den oben angeführten Veröffentlichungen bekannten Elektronenfiltern sind in allen Fällen die erreichbaren Energiebreiten nicht befriedigend; in vielen Fällen ist auch die Ortsauflösung ungenügend.

Aus einer Veröffentlichung von H. Rose e.a. (Optik 54, 235 (1979)) ist eine Anordnung bekannt, die ebenfalls aus vier Umlenkbereichen mit Um-

lenkwinkeln von 90° besteht. Durch gekrümmte Kanten der Polschuhe und drei zusätzliche Hexapole wird eine praktisch vollständige Korrektur der Bildfehler erreicht. Nachteilig bei dieser Anordnung ist jedoch der große Aufwand für die Herstellung, insbesondere für die gekrümmten Kanten. Außerdem ist dieses Elektronenfilter durch die gekrümmten Kanten schlecht justierbar.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Omega-Filter mit geraden Kanten der Polschuhe zu schaffen, das eine gute Ortsauflösung hat, kleine Energiebreiten ermöglicht und mit einer möglichst geringen Anzahl von Hexapolen auskommt.

Die gestellte Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß die Umlenkwinkel größer als 90° sind.

In einer vorteilhaften Ausführung liegen die Umlenkwinkel in dem im abhängigen Anspruch 2 angegebenen Wertebereich.

Das Energiefilter kann lediglich aus vier Umlenkbereichen zur Beeinflussung des Elektronenstrahles aufgebaut sein. Für diesen Fall gibt der Anspruch 3 vorteilhafte Wertebereiche für die Winkel zwischen den Polschuhkanten und den Wellenfronten des Elektronenstrahles an.

In einer besonders vorteilhaften Ausführungsform werden die Randfelder, welche außerhalb der Kanten der Polschuhe entstehen, durch Abschirmplatten (in der Literatur teilweise auch als mirror plates oder field clamps bezeichnet) wesentlich verkleinert. Diese Abschirmplatten sind mindestens an den Stellen, wo der Elektronenstrahl in die Umlenkbereiche ein- und austritt, in einem geringen Abstand von den Polschuhkanten und vorzugsweise in gleicher Höhe wie die Polschuhoberflächen angeordnet. In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform bilden die Abschirmplatten mit den Polschuhen ein gemeinsames Teil z.B. aus Weicheisen, wobei die Spulen zur Erzeugung des Magnetfeldes in einen in sich geschlossenen Kanal eingelegt sind, der die Polschuhoberflächen von den umgebenden Abschirmflächen trennt. Diese Technik zur Herstellung von homogenen Magnetfeldern mit kleinen und definierten Randfeldern ist aus einer Arbeit von A.V. Crewe

e.a. (Rev. Sci. Instr. 42, 411 (1971)) bekannt.

In einer anderen vorteilhaften Ausführung ist zur Beeinflussung des Elektronenstrahls zwischen dem zweiten und dem dritten Umlenkbereich ein Hexapol als zusätzliches Mittel zur Korrektur der Bildfehler angeordnet. Für diesen Fall gibt der Anspruch 7 vorteilhafte Wertebereiche für die Winkel zwischen den Polschuhkanten und den Wellenfronten des Elektronenstrahles an. Auch in diesem Fall werden in einer besonders vorteilhaften Ausführungsform Abschirmplatten benutzt, welche mit den Polschuhen ein gemeinsames Teil bilden können.

Sowohl bei der Ausführung ohne Hexapol als auch bei der Ausführung mit Hexapol liegt in der Mittelebene des Filters ein stigmatisches Bild der Eingangsbildebene. Außerdem erfolgt bei beiden Ausführungen eine achromatische und stigmatische Abbildung der Eingangsbildebene in die Ausgangsbildebene im Maßstab 1:1, sowie eine dispersive und stigmatische Abbildung der Eingangsquellebene in die Ausgangsquellebene.

Ein wesentlicher Vorteil der Energiefilter mit Abschirmplatten besteht darin, daß sie leicht zu justieren sind und daß Störfelder gut abgeschirmt werden.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von in den Figuren 1 bis 3b dargestellten Ausführungsbeispielen näher erläutert. Dabei zeigen

Fig. 1 ein Omega-Filter ohne Hexapol;

Fig. 2 ein Omega-Filter mit Hexapol;

Fig. 3a einen Schnitt durch ein Ablensystem aus zwei Polschuhen mit integrierten Abschirmplatten und

Fig. 3b eine Draufsicht auf einen Polschuh mit integrierten Abschirmplatten.

In den Figuren 1 und 2 ist die Zeichenebene diejenige Ebene in welcher die Mittelachse 11 des Elektronenstrahles durch das Filter läuft. Wie

alle anderen bekannten Omega-Filter sind auch diese Filter symmetrisch zur Mittelebene aufgebaut, welche senkrecht auf der Zeichenebene steht und diese in der Linie 10 schneidet. In dieser Symmetrieebene liegt ein Zwischenbild der (virtuellen) Eingangsbildebene B_E , welche von Omega-Filter in die (virtuelle) Ausgangsbildebene B_A abgebildet wird.

Die in den Figuren 1 und 2 dargestellten Filter bestehen aus Magneten, von denen die unter der Zeichenebene liegenden Polschuhe 12, 13 und 14 mit ihren Kanten 12a, 13a und 14a dargestellt sind. Zwischen den unter- und oberhalb der Zeichenebene liegenden Polschuhen, welche spiegelbildlich gleich zur Zeichenebene ausgebildet sind, bestehen homogene Magnetfelder, welche den Elektronenstrahl in den Umlenkbereichen 12b, 13b, 14b und 12e auf Kreisbahnen mit den Umlenkradien R_1 und R_2 um den Winkel ϕ ablenken, wobei die exakten Radien und Winkel von der Energie der Elektronen abhängen, wodurch in der Ausgangsebene Q_A ein Energiespektrum entsteht, von dem Bereiche ausgeblendet werden können.

Beim Eintritt des Elektronenstrahles 11 in den ersten Umlenkbereich 12b bildet die Kante 12c des Polschuhes 12 (und entsprechend die nicht gezeichnete Kante des zur Zeichenebene spiegelbildlich angeordneten zweiten Polschuhes für das Magnetfeld) mit der Richtung 11a der Wellenfront des Elektronenstrahles 11 den Winkel ϵ_1 . Zwischen der Richtung 11b der Wellenfront des aus dem Umlenkbereich 12b austretenden Elektronenstrahles 11 und der Kante 12d des Polschuhes 12 besteht der Winkel ϵ_2 . Entsprechende Winkel ϵ_3 und ϵ_4 gelten beim Ein- und Austritt in den zweiten Umlenkbereich 13b.

Im weiteren Verlauf bestehen infolge des symmetrischen Aufbaues des Filters die entsprechenden Winkel, wie in Figur 1 angegeben. Durch geeignete Wahl dieser zwischen den Wellenfronten und Polschuhkanten bestehenden Winkel läßt sich eine Fokussierung des Elektronenstrahles auch in der zur Zeichenebene senkrechten Ebene erreichen. Für eine gute Korrektur der Abbildungsfehler haben sich für die in Figur 1 dargestellte Anordnung als besonders vorteilhaft folgende Bereiche herausgestellt:

$$\begin{aligned}
 100^\circ &\leq \phi \leq 115^\circ \\
 25^\circ &\leq \varepsilon_1 \leq 40^\circ \\
 30^\circ &\leq \varepsilon_2 \leq 45^\circ \\
 15^\circ &\leq \varepsilon_3 \leq 30^\circ \\
 10^\circ &\leq \varepsilon_4 \leq 35^\circ \\
 0,8 &\leq R_2/R_1 \leq 1,6
 \end{aligned}$$

Die weiteren geometrischen Abmessungen des Energiefilters d_1 , l_1 , l_2 , l_3 und R_2 / R_1 ergeben sich dann zwangsläufig aus der Forderung einer mindestens annähernd stigmatischen Abbildung der (virtuellen) Eingangsbildebene B_E in die (virtuelle) Ausgangsbildebene B_A und der Eingangsquellenebene Q_E in die Ausgangsquellebene Q_A .

Die in der Figur 1 dargestellten Polschuhe 12, 13 und 14 haben sehr ausgedehnte Randfelder, welche den Elektronenstrahl 11 auch außerhalb der Umlenkbereiche 12b, 13b, 14b und 12e beeinflussen. Diese Randfelder lassen sich durch Abschirmplatten wesentlich verkleinern. In den Figuren 3a und 3b ist eine besonders vorteilhafte Ausführungsform hierfür dargestellt, bei welcher der in Figur 1 mit 12 bezeichnete Polschuh 32 ein gemeinsames Teil 30 mit den Abschirmplatten bildet. Das Teil 30 kann ebenso wie das zum Ablensystem gehörende zweite Teil 31 z.B. aus Weicheisen sein. In die Teile 30 und 31 sind Nuten 34 und 35 mit der Breite S eingearbeitet, deren innere Kontur die Form der Polschuhe 32 und 33 z.B. mit den Kanten 32c und 32d bildet. Die äußere Kontur der Nuten 34 und 35 bildet z.B. die Kanten 40c und 40d der Abschirmplatte 38. Ein durch die in den Nuten 34 und 35 liegenden Spulen 36 und 37 fließender Strom erzeugt zwischen den Polschuhen 32 und 33 ein homogenes magnetisches Feld. Außerhalb der Nuten 34 und 35 entsteht dagegen kein magnetisches Feld, so daß das Randfeld im wesentlichen auf die Breite S der Nuten beschränkt ist. Zweckmäßigerweise ist der Abstand D der Abschirmplatten 38 und 39 an den Stellen 41, wo der Elektronenstrahl 11 durchläuft, ebenso groß wie der Abstand der Polschuhoberflächen 32 und 33. Das muß jedoch nicht der Fall sein. An den übrigen Stellen 40 liegen die Abschirmplatten 38 und 39 unmittelbar aufeinander.

Die größte Anzahl von Bildpunkten, die ohne Verlust an Ortsauflösung

Übertragen werden, und die geringsten Fehler in der Ausgangsebene Q_A , so daß kleine Energiebreiten erreichbar sind, werden durch die im Anspruch 5 angegebenen Werte erreicht. Dabei sind die geometrischen Abmessungen des Filters so normiert, daß durch geeignete Wahl von R_1 die Summe der Abstände $d_1 + l_1$ dem Abstand zwischen Quellebene und Bildebene angepaßt werden kann, der vom Abbildungssystem eines beliebigen Elektronenmikroskops vorgegeben ist.

In Figur 2 ist ein im Aufbau ähnliches Omega-Filter dargestellt, das sich von dem in Figur 1 gezeigten Filter durch eine etwas andere Dimensionierung und durch einen Hexapol 21 unterscheidet. (Da der Aufbau des übrigen Filters ähnlich ist, wurden die gleichen Bezugszeichen wie in Figur 1 verwendet.) Durch den in der Elektronenoptik bekannten Hexapol (einem magnetischen System mit sechs Polschuhen, die radial zur Achse des Elektronenstrahles angeordnet sind), ist eine noch etwas bessere Korrektur der Abbildungsfehler in der Ausgangsebene Q_A möglich, so daß mit der in Figur 2 dargestellten Anordnung eine Verbesserung der Energieauflösung um den Faktor 1,6 gegenüber der mit der in Figur 1 dargestellten Anordnung erreicht wird. Bei gängigen Elektronenmikroskopen mit einem Endbildradius von 50 mm sind damit Energiebreiten ΔE bis zu 2,1 eV gegenüber 3,3 eV möglich.

Es ist selbstverständlich, daß im Strahlengang noch weitere Hexapole angeordnet werden können, mit denen jedoch, wenn das Omega-Filter richtig dimensioniert ist, die Abbildungseigenschaften nicht mehr verbessert werden.

Für das in Figur 2 dargestellte Energiefilter haben sich als vorteilhaft folgende Bereiche herausgestellt

$$100^\circ \leq \phi \leq 115^\circ$$

$$10^\circ \leq \varepsilon_1 \leq 30^\circ$$

$$25^\circ \leq \varepsilon_2 \leq 45^\circ$$

$$10^\circ \leq \varepsilon_3 \leq 30^\circ$$

$$15^\circ \leq \varepsilon_4 \leq 35^\circ$$

$$0.8 \leq R_2/R_1 \leq 1.6$$

Auch bei dieser Ausführungsform ist es besonders vorteilhaft die Ausdehnung der Randfelder durch Abschirmplatten - wie z.B. in den Figuren 3a und 3b dargestellt - zu verkleinern. Die besten Abbildungseigenschaften werden durch die im Anspruch 9 angegebenen Werte erreicht. Selbstverständlich ist auch in diesem Fall durch geeignete Wahl von R_1 eine Anpassung an jedes beliebige Elektronenmikroskop möglich.

Patentansprüche:

1. Abbildendes magnetisches Elektronenenergiefilter vom Omega-Typ, vorzugsweise für Elektronenmikroskope, mit vier Umlenk winkeln in Magnetfeldern, dadurch gekennzeichnet, daß die Umlenk winkel (ϕ) größer als 90° sind.

2. Energiefilter nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch Umlenk winkel (ϕ) in folgendem Wertebereich

$$100^\circ \leq \phi \leq 115^\circ$$

und ein Verhältnis der Umlenk radien (R_1, R_2) in folgendem Wertebereich

$$0,8 \leq R_2/R_1 \leq 1,6$$

3. Energiefilter nach Anspruch 2, gekennzeichnet durch Wertebereiche für die Winkel ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$) zwischen den Polschuhkanten (12c, 12d) und den Richtungen (11a, 11b) der Wellenfronten des Elektronenstrahles (11)

$$25^\circ \leq \epsilon_1 \leq 40^\circ$$

$$30^\circ \leq \epsilon_2 \leq 45^\circ$$

$$15^\circ \leq \epsilon_3 \leq 30^\circ$$

$$10^\circ \leq \epsilon_4 \leq 35^\circ$$

und dadurch, daß die geometrischen Abmessungen ($d_1, l_1, l_2, l_3, R_2/R_1$) so gewählt sind, daß in der Ausgangsbildebene (B_A) eine mindestens annähernd stigmatische Abbildung der Eingangsbildebene (B_E) und in der Ausgangsquellebene (Q_A) eine mindestens annähernd stigmatische Abbildung der Eingangsquellebene (Q_E) erfüllt ist.

4. Energiefilter nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß vor dem ersten Umlenkbereich (12b), zwischen den Umlenkbereichen (12b, 13b, 14b, 12e) und nach dem letzten Umlenkbereich (12e) Abschirmplatten (38, 39) angeordnet sind, deren Oberflächen mindestens annähernd in

der Höhe der Oberflächen der Polschuhe (32, 33) liegen und deren Kanten (40c, 40d) im geringen Abstand (5) parallel zu den Kanten (32c, 32d) der Polschuhe angeordnet sind.

5. Energiefilter nach Anspruch 3, gekennzeichnet durch folgende Werte

$$\begin{aligned}\phi &= 108^\circ \\ \varepsilon_1 &= 32,0^\circ \\ \varepsilon_2 &= 38,0^\circ \\ \varepsilon_3 &= 24,5^\circ \\ \varepsilon_4 &= 24,1^\circ \\ R_2/R_1 &= 1\end{aligned}$$

und durch folgende geometrische Abmessungen

$$\begin{aligned}d_1 &= 1,00 R_1 \\ l_1 &= 0,66 R_1 \\ l_2 &= 2,52 R_1 \\ l_3 &= 0,79 R_1 \\ S &= 0,10 R_1 \\ D &= 0,10 R_1\end{aligned}$$

wobei R_1 so gewählt wird, daß die Summe $d_1 + l_1$ gleich dem Abstand zwischen Quellebene und Bildebene ist, der vom Abbildungssystem des Elektronenmikroskops vorgegeben ist.

6. Energiefilter nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen dem zweiten Umlenkbereich (13b) und dem dritten Umlenkbereich (14b) ein Hexapol (21) angeordnet ist.

7. Energiefilter nach Anspruch 6, gekennzeichnet durch folgende Wertebereiche für die Winkel ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$) zwischen den Polschuhkanten (12c, 12d) und den Richtungen (11a, 11b) der Wellenfronten des Elektronenstrahles (11)

$$10^\circ \leq \varepsilon_1 \leq 30^\circ$$

$$25^\circ \leq \varepsilon_2 \leq 45^\circ$$

$$10^\circ \leq \varepsilon_3 \leq 30^\circ$$

$$15^\circ \leq \varepsilon_4 \leq 35^\circ$$

und dadurch daß die geometrischen Abmessungen (d_1 , l_1 , l_2 , l_3 , R_2/R_1) so gewählt sind, daß in der Ausgangsbildebene (B_A) eine mindestens annähernd stigmatische Abbildung der Eingangsbildebene (B_E) und in der Ausgangsquellebene (Q_A) eine mindestens annähernd stigmatische Abbildung der Eingangsquellebene (Q_E) erfüllt ist.

8. Energiefilter nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß vor dem ersten Umlenkbereich (12b), zwischen den Umlenkbereichen (12b, 13b, 14b, 12e) und nach dem letzten Umlenkbereich (12e) Abschirmplatten (38, 39) angeordnet sind, deren Oberflächen mindestens annähernd in der Höhe der Oberflächen der Polschuhe (32, 33) liegen und deren Kanten (40c, 40d) im geringen Abstand (S) parallel zu den Kanten (32c, 32d) der Polschuhe angeordnet sind.

9. Energiefilter nach Anspruch 8, gekennzeichnet durch folgende Werte

$$\alpha = 104^\circ$$

$$\varepsilon_1 = 18,0^\circ$$

$$\varepsilon_2 = 39,0^\circ$$

$$\varepsilon_3 = 27,5^\circ$$

$$\varepsilon_4 = 30,1^\circ$$

$$R_2/R_1 = 1$$

und durch folgende geometrische Abmessungen

$$d_1 = 1,03 R_1$$

$$l_1 = 0,92 R_1$$

$$l_2 = 2,43 R_1$$

$$l_3 = 1,34 R_1$$

$$S = 0,14 R_1$$

$$D = 0,14 R_1$$

0218920

12

wobei R_1 so gewählt wird, daß die Summe $d_1 + l_1$ gleich dem Abstand zwischen Quellebene und Bildebene ist, der vom Abbildungssystem des Elektronenmikroskops vorgegeben ist.

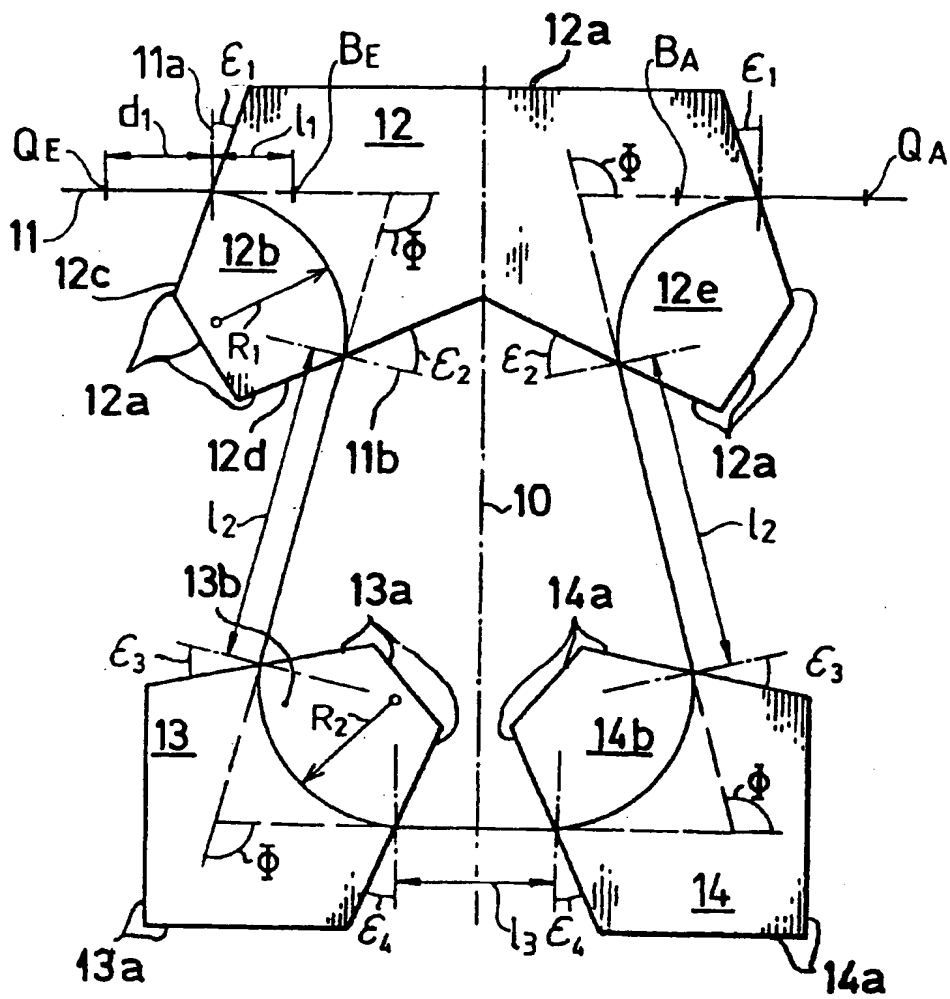
Fig.1

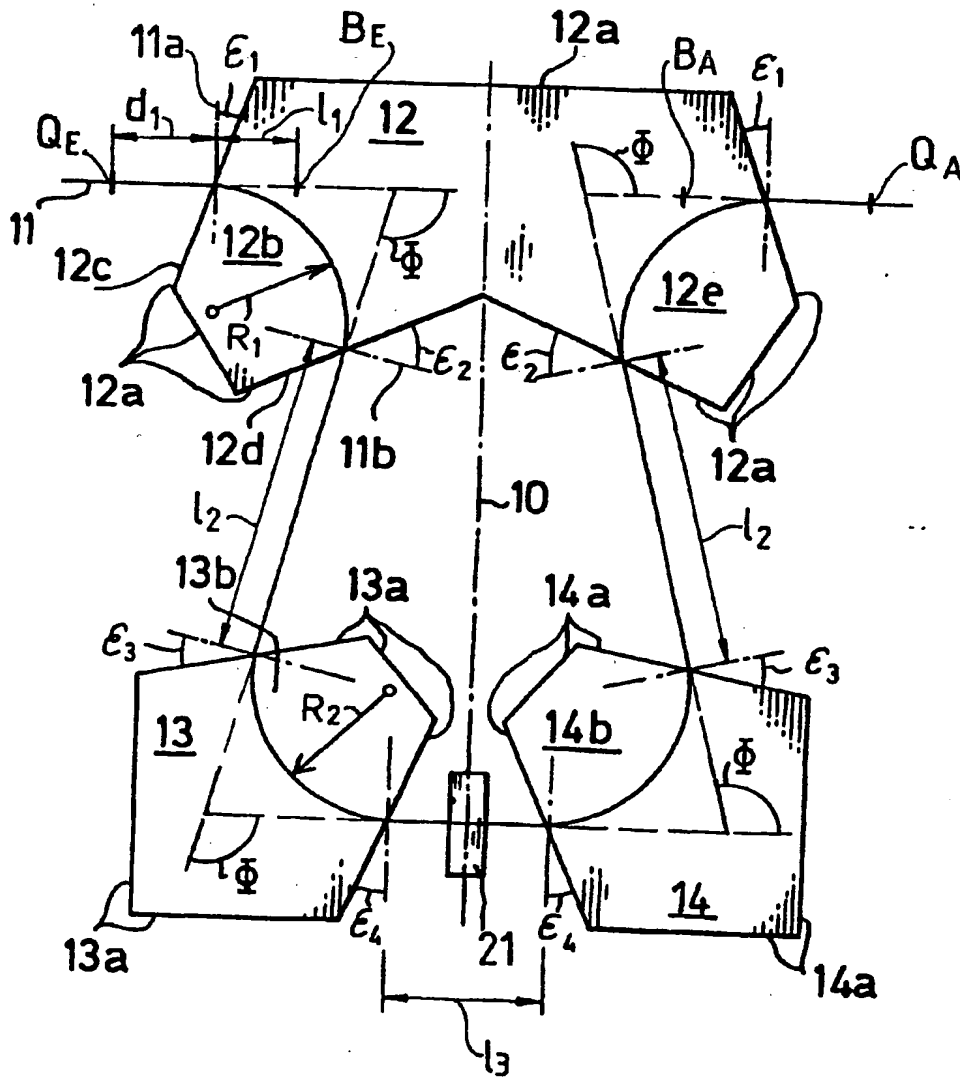
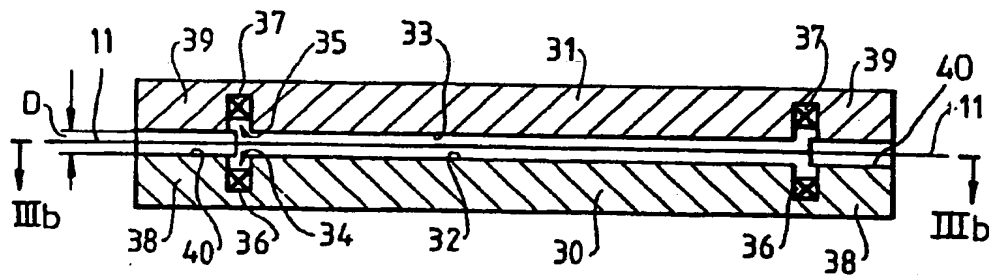
Fig. 2

Fig.3aFig.3b